

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - Trincas por fadiga do revestimento asfáltico.....	2
FIGURA 1.2 - Deformação permanente nas trilhas de roda.....	3
FIGURA 2.1 - Comportamento do ligante asfáltico em função do tempo de aplicação de carga.....	11
FIGURA 2.2 - Susceptibilidade térmica de ligantes asfálticos.....	11
FIGURA 2.3 - Resposta visco-elástica típica de um ligante asfáltico sob carregamento, destacando-se as componentes elásticas (γ_E), elástica retardada (γ_{ER}) e viscosa (γ_V).....	15
FIGURA 2.4 - Curvas de fluência realizadas a diferentes temperaturas utilizadas para determinar a curva-mestra	16
FIGURA 2.5 - Superposição tempo-temperatura.....	16
FIGURA 2.6 - Comportamento visco-elástico de materiais asfálticos a partir de ensaios dinâmicos.....	17
FIGURA 2.7 - Comportamento tensão-deformação de materiais asfálticos a partir de ensaios dinâmicos.....	18
FIGURA 2.8 - Curva-mestre típica.....	19
FIGURA 2.9 - Intervalos de temperatura para mistura e compactação em função da viscosidade do ligante asfáltico.....	20
FIGURA 2.10 - Comparação entre as especificações tradicionais	26

FIGURA 3.1 - Milhões de pneus descartados anualmente nos EUA.....	34
FIGURA 3.2 - Incêndio de pneus nos Estados Unidos causa a contaminação do ar, da água e do solo.....	35
FIGURA 3.3 - Os pneus retirados do Rio Tietê, em São Paulo-SP, acumulam-se na margem	37
FIGURA 3.4 - Destino final de pneus descartados	39
FIGURA 3.5 - Milhões de pneus dispostos inadequadamente.....	44
FIGURA 3.6 - Configuração de selante "band-aid"	45
FIGURA 3.7 - Aplicador manual utilizado na selagem de trincas	51
FIGURA 3.8 - Aplicação de selante de trincas no Estado do Arizona.....	52
FIGURA 3.9 - Execução de um SAM	53
FIGURA 3.10 - Execução de um SAMI.....	54
FIGURA 3.11 - Exemplo de usina de asfalto-borracha no Estado da Flórida....	56
FIGURA 3.12 - Esquema de produção de concreto asfáltico com asfalto- borracha.....	56
FIGURA 4.1 - Fatores que influenciam a produção do ligante asfalto-borracha.....	58
FIGURA 4.2 - Curva granulométrica da borracha fornecida pela Relastomer	69
FIGURA 4.3 - Efeito do tempo de mistura na viscosidade do ligante asfalto- borracha.....	71
FIGURA 4.4 - Efeito do tempo de reação na viscosidade do ligante asfalto- borracha.....	72
FIGURA 4.5 - Viscosidade do ligante asfalto-borracha: efeito preponderante do teor de borracha em relação à temperatura da mistura	72
FIGURA 4.6 - Equipamento utilizado na preparação de ligante asfalto- borracha.....	73
FIGURA 4.7 - Equipamento utilizado na preparação de misturas asfalto- borracha no Laboratório de Asfalto do Cenpes	74

FIGURA 4.8 - Agitador mecânico e panela elétrica utilizados na preparação dos ligantes asfalto-borracha no Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da EESC/USP.....	75
FIGURA 4.9 - Recipiente utilizado para armazenar o ligante asfalto-borracha.....	77
FIGURA 5.1 - Histograma dos valores de temperatura de mistura (Fonte: Trabalhos listados na Tabela 4.1).....	83
FIGURA 5.2 - Histograma dos valores de tempo de reação (Fonte: Trabalhos listados na Tabela 4.1).....	83
FIGURA 5.3 - Equipamento utilizado na determinação da penetração de ligantes asfálticos.....	90
FIGURA 5.4 - Equipamento utilizado na determinação do ponto de amolecimento de ligantes asfálticos - Método Anel e Bola.....	91
FIGURA 5.5 - Equipamento utilizado na determinação do ponto de fulgor de ligantes asfálticos.....	92
FIGURA 5.6 - Equipamento utilizado na determinação da viscosidade Saybolt-Furol.....	93
FIGURA 5.7 - Equipamento Utilizado na Determinação da Ductilidade.....	94
FIGURA 5.8 - Fluxograma da estratégia utilizada no desenvolvimento da especificação de ligante asfáltico Superpave (adaptada de ANDERSON <i>et al.</i> , 1991).....	95
FIGURA 5.9 - Viscosímetro Brookfield utilizado para determinar a viscosidade aparente de ligantes asfálticos.....	97
FIGURA 5.10 - Detalhe do sistema de controle de temperatura e da câmara onde é colocada a amostra de ligante asfáltico.....	97
FIGURA 5.11 - Hastes (<i>spindles</i>) utilizadas no viscosímetro Brookfield.....	97
FIGURA 5.12 - Operação do viscosímetro rotacional.....	98
FIGURA 5.13 - Reômetro de cisalhamento dinâmico.....	99
FIGURA 5.14 - Esquema de um Reômetro de cisalhamento dinâmico.....	99

FIGURA 5.15 - Funcionamento de um reômetro de cisalhamento dinâmico.....	101
FIGURA 5.16 - Estufa de Filme Fino Rotativo (Ensaio RTFOT)	102
FIGURA 5.17 - Frascos utilizados no ensaio RTFOT.....	102
FIGURA 5.18 - Vaso de pressão (PAV) utilizado para envelhecimento acelerado de ligantes asfálticos.....	103
FIGURA 5.19 - Detalhe do vaso de pressão para ensaio de envelhecimento de longo prazo - foto de equipamento da Universidade do Texas em Austin	104
FIGURA 5.20 - Reômetro de viga à flexão	105
FIGURA 5.21 - Esquema do reômetro de viga à flexão - adaptado de HARRIGAN, LEAHY e YOUTCHEFF (1994).....	105
FIGURA 6.1 - Efeito do teor de borracha na penetração do ligante asfalto- borracha.....	108
FIGURA 6.2 - Efeito do teor de borracha no ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha	110
FIGURA 6.3 - Efeito do teor de borracha no ponto de fulgor do ligante asfalto-borracha.....	111
FIGURA 6.4 - Variação da viscosidade em função do teor de borracha	114
FIGURA 6.5 - Viscosidade do ligante asfalto-borracha em função do teor e da granulometria da borracha.....	114
FIGURA 6.6 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento complexo	116
FIGURA 6.7 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase, δ	117
FIGURA 6.8 - Efeito do teor de borracha na resistência à deformação permanente, representada pelo parâmetro $(G^*/\text{sen}\delta)$	117
FIGURA 6.9 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico	119
FIGURA 6.10 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase, δ	120

FIGURA 6.11 - Efeito do teor de borracha na resistência à deformação permanente.....	120
FIGURA 6.12 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico.....	122
FIGURA 6.13 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase, δ	123
FIGURA 6.14 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por fadiga	123
FIGURA 6.15 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por contração térmica	125
FIGURA 6.16 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por contração térmica	125
FIGURA 6.17 - Efeito do teor e da granulometria da borracha no ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha.....	143
FIGURA 6.18 - Efeito do teor e da granulometria da borracha no ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha.....	144
FIGURA 6.19 - Efeito do teor e da granulometria da borracha no ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha.....	144
FIGURA 6.20 - Efeito do teor de borracha e da temperatura de mistura no ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha	145
FIGURA 6.21 - Efeito do teor de borracha no ponto de fulgor do ligante asfalto-borracha.....	146
FIGURA 6.22 - Efeito do teor de borracha e da temperatura de mistura na penetração do ligante asfalto-borracha.....	147
FIGURA 6.23 - Efeito do teor de borracha e da temperatura de mistura na penetração do ligante asfalto-borracha.....	147
FIGURA 6.24 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na penetração do ligante asfalto-borracha.....	148
FIGURA 6.25 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na penetração do ligante asfalto-borracha.....	148

FIGURA 6.26 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha - 175°C.....	149
FIGURA 6.27 - efeito do teor e da temperatura de mistura na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha - 175°C.....	150
FIGURA 6.28 - Efeito do teor e da temperatura de mistura na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha - 175°C.....	150
FIGURA 6.29 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha - 175°C.....	151
FIGURA 6.30 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha - 135°C.....	151
FIGURA 6.31 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha - 135°C.....	152
FIGURA 6.32 - efeito do teor e da temperatura de mistura na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha - 135°C.....	152
FIGURA 6.33 - Efeito do teor e da temperatura de mistura na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha - 135°C.....	153
FIGURA 6.34 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento	154
FIGURA 6.35 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento.....	154
FIGURA 6.36 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento.....	155
FIGURA 6.37 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento.....	155
FIGURA 6.38 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento.....	156
FIGURA 6.39 - Efeito do teor de borracha na resistência à deformação permanente do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento	156

FIGURA 6.40 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de curto prazo	157
FIGURA 6.41 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de curto prazo	157
FIGURA 6.42 - Efeito do teor de ligante nas resistências à deformação permanente do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de curto prazo	158
FIGURA 6.43 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	159
FIGURA 6.44 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	159
FIGURA 6.45 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	160
FIGURA 6.46 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	160
FIGURA 6.47 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	161
FIGURA 6.48 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	161
FIGURA 6.49 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	162
FIGURA 6.50 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	162

FIGURA 6.51 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por fadiga do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	163
FIGURA 6.52 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por fadiga do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	163
FIGURA 6.53 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por fadiga do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	164
FIGURA 6.54 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por fadiga do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo	164
FIGURA 6.55 - Efeito do teor de borracha na rigidez do ligante asfalto-borracha.....	165
FIGURA 6.56 - Efeito do teor de borracha na rigidez do ligante asfalto-borracha.....	166
FIGURA 6.57 - Efeito do teor de borracha na rigidez do ligante asfalto-borracha.....	166
FIGURA 6.58 - Efeito do teor de borracha na rigidez do ligante asfalto-borracha.....	167
FIGURA 6.59 - Efeito do teor de borracha no módulo de relaxação (m) do ligante asfalto-borracha	167

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Especificação para cimento asfáltico de petróleo - Classificação por penetração	23
TABELA 2.2 - Especificação para cimento asfáltico de petróleo - Classificação por viscosidade	25
TABELA 2.3 - Tipos de ligantes Superpave	27
TABELA 2.4 - Classificação Superpave de Ligantes Asfálticos	29
TABELA 2.5 - Temperaturas mínima, máxima, mínima absoluta e máxima absoluta do Estado de São Paulo	30
TABELA 2.6 - Temperaturas máxima e mínima de projeto (no pavimento)	30
TABELA 2.7 - Principais modificadores utilizados em ligantes asfálticos e os defeitos que eles procuram evitar	32
TABELA 3.1 - Composição química de pneus de automóveis e caminhões	38
TABELA 3.2 - Pesquisadores que avaliaram o ligante asfalto-borracha durante as décadas de 70, 80 e 90.....	43
TABELA 3.3 - Granulometria da borracha recomendada para misturas asfálticas de graduação densa.....	55

TABELA 4.1 - Resumo de projetos de pesquisa que analisaram o ligante asfalto-borracha.....	61
TABELA 4.1 - Resumo de projetos de pesquisa que analisaram o ligante asfalto-borracha (continuação).....	62
TABELA 4.2 - Especificação para diferentes tipos de ligantes asfalto-borracha proposta por BAKER RUBBER Inc. (1988).....	63
TABELA 4.3 - Propriedades físicas de ligantes asfalto-borracha (ASTM, 1997).....	63
TABELA 4.4 - Porcentagem de borracha natural e sintética estudada por TAKALLOU <i>et al.</i> (1986).....	66
TABELA 4.5 - Propriedades químicas da borracha Relastomer.....	67
TABELA 4.6 - Efeito do teor de borracha moída nas propriedades do ligante asfalto-borracha.....	70
TABELA 5.1 - Granulometria da borracha Relastomer.....	81
TABELA 5.2 - Matriz fatorial que representa a programação dos ensaios	88
TABELA 5.3 - Numeração das amostras que representam a combinação de todos os fatores e níveis (seqüência aleatória)	88
TABELA 6.1 - Resultados de penetração (1/10 mm) das misturas asfalto-borracha.....	108
TABELA 6.2 - Resultados de ponto de amolecimento (°C)	109
TABELA 6.3 - Resultados de ponto de fulgor (°C) das misturas asfalto-borracha.....	110
TABELA 6.4 - Resultados do ensaio de viscosidade (cP) - equipamento Brookfield (temperatura de ensaio: 175°C).....	112
TABELA 6.5 - Resultados do ensaio de viscosidade (cP) - equipamento Brookfield (temperatura de ensaio: 135°C).....	113
TABELA 6.6 - Resultados de ensaio DSR do ligante virgem - G* (Pa) (temperatura de ensaio: 64°C)	115

TABELA 6.7 - Resultados de ensaio DSR do ligante virgem - δ (graus).....	115
TABELA 6.8 - Resultados de ensaio DSR do ligante virgem - G*/sen δ (kPa)	116
TABELA 6.9 - Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de curto prazo - G* (Pa) (temperatura de ensaio: 64°C)	118
TABELA 6.10 - Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de curto prazo - δ (graus)	118
TABELA 6.11 - Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de curto prazo - G*/sen δ (kPa).....	119
TABELA 6.12 - Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de longo prazo - G* (Pa) (temperatura de ensaio: 31°C)	121
TABELA 6.13 - Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de longo prazo - δ (graus)	121
TABELA 6.14 - Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de longo prazo - G*.sen δ (kPa)	122
TABELA 6.15 - Resumo dos resultados do ensaio BBR: valores de S (temperatura de ensaio: 0°C)	124
TABELA 6.16 - Resumo dos resultados do ensaio BBR: valores de m.....	124
TABELA 6.17 - Resumo da análise de variância dos resultados dos ensaio de penetração	130
TABELA 6.18 - Resumo da análise de variância dos resultados dos ensaio de ponto de amolecimento	131
TABELA 6.19 - Resumo da análise de variância dos resultados dos ensaio de ponto de fulgor	131
TABELA 6.20 - Resumo da análise de variância dos resultados do DSR antes do envelhecimento no RTFOT: G* (Pa)	132
TABELA 6.21 - Resumo da análise de variância dos resultados do DSR antes do envelhecimento no RTFOT: δ (graus)	132

TABELA 6.22 - Resumo da análise de variância dos resultados do DSR antes do envelhecimento no RTFOT: $G^*/\text{sen } \delta$ (kPa)	133
TABELA 6.23 - Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de curto prazo: G^* (Pa).....	133
TABELA 6.24 - Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de curto prazo: δ (graus).....	134
TABELA 6.25 - Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de curto prazo: $G^*/\text{sen } \delta$	134
TABELA 6.26 - Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de longo prazo: G^*	135
TABELA 6.27 - Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de longo prazo: δ (graus).....	135
TABELA 6.28 - Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de longo prazo: $G^*\text{sen } \delta$	136
TABELA 6.29 - Resumo da análise de variância dos resultados do ensaio de viscosidade aparente (Brookfield) - 175°C	136
TABELA 6.30 - Resumo da análise de variância dos resultados do ensaio de viscosidade aparente (Brookfield) - 135°C	137
TABELA 6.31 - Resumo da análise de variância dos resultados do ensaio do BBR - valores de S	137
TABELA 6.32 - Resumo da análise de variância dos resultados do ensaio do BBR - valores de m	138

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANIP	Associação Nacional de Indústrias de Pneumáticos
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BBR	Bending Beam Rheometer
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
CENPES	Centro de Pesquisa Leopoldo A. Miguez de Mello (Petrobrás)
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DSR	Dynamic Shear Rheometer
DTT	Direct Tension Tester
FHWA	Federal Highway Administration
GEIPOT	Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo
IGC	Instituto Geográfico e Cartográfico
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
PAV	Pressure Aging Vessel

PG	<i>Performance Grade</i>
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
RV	Rotational Viscometer
SAM	Stress Absorbing Membrane
SAMI	Stress Absorbing Membrane Interlayer
SHRP	Strategic Highway Research Program
Superpave	<i>Superior Performance Asphalt Pavements</i>
TRB	Transportation Research Board

RESUMO

Este trabalho apresenta estudo sobre a viabilidade técnica da incorporação de borracha de pneus em ligantes asfálticos utilizados em obras de pavimentação. Trata-se de uma alternativa para solucionar um grave problema ambiental, pois no Brasil, anualmente, são descartados mais de 30 milhões de pneus, dos quais a maior parte é disposta em locais inadequados, servindo para a procriação de vetores de doenças e representando risco de contaminação do meio-ambiente. Os efeitos dos principais fatores que condicionam o comportamento do ligante asfalto-borracha (teor e granulometria da borracha, temperatura de mistura, tempo de reação) são avaliados através de ensaios tradicionais de caracterização de ligantes asfálticos e também ensaios do Método Superpave, que determinam propriedades fundamentais, diretamente relacionadas ao desempenho dos pavimentos no campo. Os resultados da análise estatística da programação fatorial de ensaios laboratoriais desenvolvida evidenciam o efeito preponderante do teor de borracha e, principalmente, que o ligante asfalto-borracha pode aumentar a resistência ao acúmulo de deformação permanente e ao aparecimento de trincas por fadiga do revestimento.

Palavras-chaves: asfalto-borracha, borracha de pneus, ligante asfáltico, Superpave, processo úmido

ABSTRACT

This work presents the results of a study about the technical feasibility of the use of asphalt-rubber binder by the asphalt paving industry. In Brazil, more than 30 million tires a year are disposed, mostly in inadequate sites, causing serious health and environmental problems. The effects of the main factors (rubber content, rubber particle size, temperature of mixture, reaction time) on the behavior of asphalt-rubber binders are evaluated by traditional tests and also by tests of the Superpave Method, which are based on fundamental properties, directly related to field performance. The results of the statistical analysis of the factorial design of laboratory experiments show the most significant effect of rubber content and, mainly, that asphalt-rubber binder can increase the resistance to permanent deformation and fatigue cracking.

Keywords: asphalt-rubber; tire rubber; asphalt binder; Superpave, wet process